

🔗 已思考 (用时 14 秒) >

数字预失真 (DPD, Digital Pre-Distortion) 是通信系统中用于线性化功率放大器 (PA) 的关键技术。下面从为什么要用DPD、它的核心思想、模型与实现架构几个层面, 把基本原理讲清楚。

1. 为什么需要 DPD? ——功率放大器的非线性问题

在现代通信 (4G/5G/WiFi) 中, 为了提高频谱效率, 信号通常采用高峰均功率比 (PAPR) 的调制方式 (如 OFDM) 。

功率放大器 (PA) 在靠近饱和区工作时效率最高, 但此时它的非线性会变得非常严重, 导致:

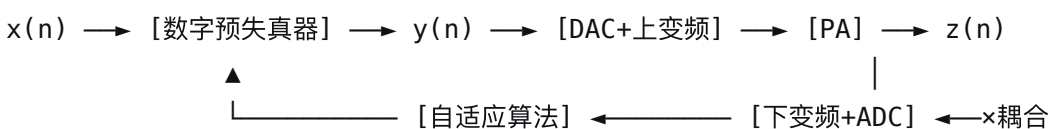
- 带内失真: 信号星座图变形, 误码率上升 (EVM恶化) 。
- 带外频谱扩展: 邻道泄漏 (ACLR) 超标, 干扰其他信道。
- 记忆效应: PA 的当前输出不仅取决于当前输入, 还与过去的输入有关 (由偏置电路的阻抗、热效应等引起), 使失真更加复杂。

既要高效 (省电), 又要保真 (信号干净), DPD 就是在数字域里“以毒攻毒”的解决方案。

2. DPD 的核心思想: 插入一个“反向”非线性

DPD 的基本原理非常直观: 在信号进入 PA 之前, 先让它经过一个与 PA 非线性特性恰好相反的数字预失真器。

text



- 设功率放大器的特性为函数 $F_{PA}(\cdot)$, 理想放大我们希望 $z(n) = G \cdot x(n)$ (G 为常数增益) 。
- 预失真器的特性设为 $F_{DPD}(\cdot)$, 其输出为 $y(n) = F_{DPD}(x(n))$ 。

- 经过 PA 后，输出 $z(n) = F_{PA}(y(n))$ 。

我们期望的级联效果是：

$$z(n) = F_{PA}(F_{DPD}(x(n))) = G \cdot x(n)$$

也就是说，DPD 的特性 F_{DPD} 应该是 PA 特性 F_{PA} 在期望增益 G 下的反函数：

$$F_{DPD} = G \cdot F_{PA}^{-1}$$

当这个反函数足够精确时，两者非线性正好抵消，系统对外表现为纯线性放大。

3. 怎样描述 PA 和 DPD? ——行为的数学模型

PA 的非线性通常用记忆多项式 (Memory Polynomial) 来逼近，它能够同时表达无记忆非线性和记忆效应：

$$z(n) = \sum_{k=1}^K \sum_{q=0}^Q a_{kq} \cdot y(n-q) \cdot |y(n-q)|^{k-1}$$

- k 为非线性阶数 (奇数阶为主，如 3,5,7...)
- q 为记忆深度 (0 表示当前时刻，1 表示前一个样点...)
- a_{kq} 是 PA 模型的复系数。

DPD 的模型通常采用完全相同的结构 (也是记忆多项式)，只不过它的系数 w_{kq} 被训练成“反向”的：

$$y(n) = \sum_{k=1}^K \sum_{q=0}^Q w_{kq} \cdot x(n-q) \cdot |x(n-q)|^{k-1}$$

这组系数 w_{kq} 需要让从 $x(n)$ 到 $z(n)$ 的整体失真最小。

4. 怎么求出这组“反向系数”? ——间接学习架构

在实际系统中，PA 的特性会随时间、温度、工作频率变化，所以 DPD 必须是自适应的。最经典的在线训练方法是间接学习结构 (Indirect Learning Architecture, ILA)。

它不直接求 PA 的逆，而是通过以下两步：

第一步：训练一个“后失真器” (PA 的逆模型)

在反馈路径中，PA 的输出 $z(n)$ 经过衰减、下变频和 ADC 得到 $z_{fb}(n)$ 。将 $z_{fb}(n)$ 作为输入，PA 的输入信号 $y(n)$ 作为期望输出，训练一个后失真器 F_{post} ，使其输出 $\hat{y}(n) \approx y(n)$ 。

$F_{post}(\cdot)$ 的系数求法：最小化误差 $e(n) = y(n) - \hat{y}(n)$ ，常用 LMS 或 RLS 等自适应算法。

第二步：将后失真器的系数直接复制为预失真器

如果后失真器满足 $F_{post}(z(n)/G) \approx y(n)$ ，那么从函数关系可以证明，当 PA 特性变化较慢时，这个后失真器的模型就是 PA 的逆模型。因此，我们把训练好的后失真器系数 w_{kq} 原封不动地复制到前向通路上的预失真器中：

$$F_{DPD} = F_{post}$$

这样，预失真器就对 PA 形成了准确的预补偿，整体链路被线性化了。这个“训练后复制”的过程周期性地地进行，实现连续自适应。

5. 从信号角度看 DPD 做了什么

频谱图上可以直观理解：

- 原始信号：有特定的带宽。
- PA 直接放大：出现频谱展宽（肩部隆起），ACLR 恶化。
- DPD 后的信号 $y(n)$ ：在进入 PA 前被人为地扩展出了“反向”的肩部，其频谱畸变正好与 PA 将要产生的失真互为镜像。
- PA 输出：这些人为加入的失真与 PA 自身产生的失真相互抵消，恢复出干净的信号频谱。

本质上，DPD 在数字域注入了抵消非线性分量的高阶交调成分，使得经过 PA 后交调成分被抑制。

6. 关键点总结

- 目标：让“预失真器 + PA”的级联表现出一根干净、线性的增益线。
- 模型：常用记忆多项式（Volterra 级的简化），用一组基函数 $(x(n-q)|x(n-q)|^{k-1})$ 的线性组合来逼近非线性和记忆效应。
- 参数获取：间接学习结构，在反馈路径训练一个后失真器，然后复制系数到前向预失真器。
- 自适应性：利用收发器的反馈通道持续更新系数，跟踪温度、老化、频率变化。
- 应用：几乎所有现代通信基站和终端的射频前端都会使用 DPD，它使 PA 能在接近饱和的高效区工作，同时满足严格的线性度要求。

这就是通信中 DPD 的基本原理——通过数字域构建一个可自适应的 PA 逆模型，提前补偿非线性，实现高效又干净的信号放大。